مقاله مروری

فناوری پلیمر ایران

فصلنامه علمی
سال هفتم، شماره ۳، شماره پیاپی ۲۷، پاییز ۱۴۰۱
Vol. 7, No. 3, Issue No. 27
Autumn 2022, Quarterly
صفحه ۱۴-۵

Iran Polymer Technology: Research and Development

مروری بر پوشش‌های آلی ضدخوردگی خطوط لوله مدفون انتقال نفت و گاز

امیرحسین یزدان بخش[1*]، سارینا فقیر[2]

۱ تهران، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی شیمی، دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی پلیمر

۲ تهران، نیاوران، خیابان باهنر، مدیرعامل شرکت ساوالان پلیمرآرتا

چکیده ...

با توجه به گستردگی جغرافیایی و آب‌وهوای گرم‌وخشک جنوب ایران که بخش اعظم تأسیسات نفت و گاز کشور در آن قرار دارد، مسئله خوردگی خطوط لوله مدفون انتقال نفت و گاز در صنعت نفت ایران از اهمیت خاصی برخوردار است. درحال‌حاضر استفاده از پوشش‌های آلی ضدخوردگی در کنار حفاظت کاتدی، موثرترین راه پیشگیری از خوردگی لوله‌های مدفون شناخته می‌شود. به این منظور، در این پژوهش ویژگی‌ها، قابلیت‌ها و عملکرد پوشش‌های اپوکسی، پلی‌الفینی، پلی‌یورتان و پلی‌اوره بررسی و مقایسه شده است. همچنین با توجه به نقش مهم تولید داخلی در صنعت نفت و گاز ایران، پوشش‌های شناخته‌شده و تجاری موجود داخلی معرفی گشته و بر لزوم توجه مضاعف به این عرصه و رسیدن به فناوری‌های روز جهان تأکید گشته است. با توجه به اهمیت صنعت نفت‌وگاز در ایران، پیشرفت‌های قابل‌توجهی در زمینه تولید داخلی پوشش‌های اپوکسی، پلی‌الفینی چندلایه و پلی‌یورتان صورت گرفته است. پوشش‌های پلی‌اوره، به نوعی نسل جدید پوشش‌های پلی‌یورتان هستند که مزایای رقابتی منحصربه‌فردی را ارائه داده که لزوم توجه ویژه به تولید داخلی آن را موکد می‌سازد.

واژه‌های کلیدی:

پوشش،
خوردگی،
لوله،
مدفون،
گاز

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
a.yazdanbakhsh@ut.ac.ir

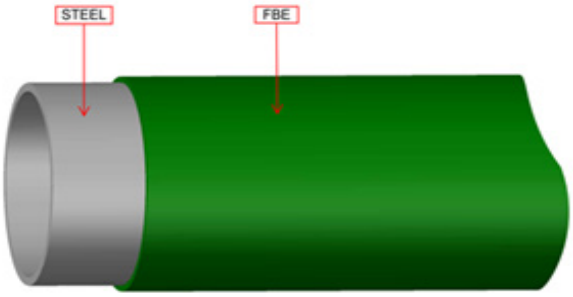
۱ مقدمه

تأمین سوخت، یکی از مسائل اساسی هر کشور بوده و انتقال ارزان و مطمئن آن مسئله‌ای حیاتی‌ست. از راه‌های سریع، مطمئن و پیوسته در انتقال مواد سوختی (نفت و گاز) استفاده از لوله‌کشی است که دراین روش با چالشی به نام خوردگی مواجه هستیم. خوردگی یکی از مشکلات عمده در صنایع نفت و گاز به‌شمار می‌آید. به دنبال خوردگی و نشت مواد سوختی از لوله‌ها و تعمیر و بازسازی آن‌ها به روش‌های سنتی، علاوه برصرف وقت و هزینه زیاد آسیب‌های زیست محیطی فراوانی به محیط زیست وارد می‌شود. بنابراین ساخت و کارایی پوشش‌های ضدخوردگی برای صنعت نفت و گاز بسیار حائز اهمیت است. لوله‌های زیرزمینی در سراسر جهان برای انتقال نفت و گاز استفاده می‌شوند. این خطوط لوله که عمدتاً به صورت مدفون در خاک استفاده می‌شوند، همواره با مشکلات متعددی از نظر حفظ و نگهداری روبرو بوده و به همین علت بازسازی و تعمیر خطوط لوله از نظر اقتصادی و فنی همواره مورد توجه بوده است.خوردگی در اصطلاح به فرایندی اطلاق می‌شود که در اثر واکنش شیمیایی یا فعالیت بیولوژیکی، موجبات تخریب فلز فراهم شود. این تخریب بین فلز و محیط اطراف آن صورت گرفته و خسارات مالی به بار می‌آورد. خوردگی را تخریب یا فاسد شدن یک ماده در اثر واکنش یا محیطی که در آن قرار دارد تعریف می‌کنند که انواع مختلفی دارد (خوردگی یکنواخت، خوردگی شیمیایی یا موضعی، خوردگی مرزدان‌های و ...). خوردگی زیر عایق مشکل ایمنی اساسی‌ای است که از مدتها قبل در صنعت شناخته شده و حالت بحرانی به‌خود گرفته است. از یک لحاظ هر روز صنایع پیچیده‌تر می‌شوند. برای نمونه، صنایع شیمیایی پتروشیمی تجهیزات و خطوط لوله بسیار گسترده‌ای دارند و عایق‌کاری این تجهیزات بسیار مشکل بوده و تجربه بالای کاری را می‌طلبد. یکی از موثرترین راه‌های کنترل خوردگی، انتخاب و اعمال پوشش‌های مناسب برای محافظت در برابر خوردگی است. از سال ۱۹۷۱، دولت آمریکا شرکت‌های نفت و گاز را ملزم کرده است که کلیه خطوط لوله خود را قبل از نصب در زیر خاک یا آب، با مواد مناسب (پوشش کنترل‌کننده‌ی خوردگی) پوشش دهند. سال‌ها است که در صنعت نفت و گاز، از پوشش‌ها و نوارهای محافظ در برابر خوردگی، به‌طور موفقیت‌آمیزی بر روی لوله‌ها استفاده می‌شود. این محافظ‌ها انواع مختلفی دارند. در ابتدا روی لوله‌ها را با نوار قیر اندود به صورت مارپیچی می‌پیچیدند و سپس با فرچه، قطران زغال سنگ را روی آن می‌مالیدند. امروزه از پوشش‌هایی از جنس اپوکسی، پلی‌الفین‌ها و پلی‌یورتان استفاده می‌شود. صنعت خط لوله (که تعریف غیردقیق آن «صنعت نفت و گاز» بوده و «لوله‌کشی عایق‌نشده به‌عنوان خطوط انتقال شناخته می‌شود») و صنعت عایق‌کاری (که به سامانه‌های لوله‌کشی عایق‌کاری‌شده مربوط می‌شود)، از بعضی جنبه‌ها با هم متفاوت هستند، ولی موفقیت و رشد در صنعت پوشش خطوط لوله، این پرسش را مطرح کرده است که چرا سایر صنایع، از این دانش برای محافظت از سامانه‌های لوله‌کشی و فرایند خود استفاده نمی‌کنند. اعمال پوشش روی خطوط لوله، لزوم تعویض زودهنگام سامانه‌های لوله‌کشی را برطرف کرده است و در نتیجه از صرف هزینه‌های هنگفت برای این قبیل پروژه‌ها جلوگیری می‌شود. همچنین بدینوسیله نظر گروه‌های طرفدار محیط‌زیست و سازمان‌های حفاظت از محیط‌زیست تأمین می‌شود [۵-۱].

خوردگی دیواره خارجی خطوط انتقال نفت و گاز ناشی از تماس دیواره بیرونی لوله مدفون شده با خاک است که میزان این خوردگی رابطه مستقیمی با مقدار خورندگی خاک دارد. بنابراین با توجه به حجم بسیار زیاد لوله‌های به‌کار رفته در محیط خاک، بررسی میزان خوردگی لوله‌های انتقال نفت و گاز به‌عنوان بحث بسیار مهم اقتصادی مطرح است. فاکتورهای زیادی در تعیین میزان خورندگی خاک موثر است و بررسی این فاکتورها و ارائه راهکار برای کاهش آن‌ها و جلوگیری از انهدام سازه‌های درون خاکی مانند لوله‌های انتقال نفت و گاز از اهمیت بسیار بالایی بر خوردار است. می توان خاک را محیطی ناهمگون از خلل و فرج دانست که فضای سوراخ‌های آن می‌تواند با آب یا گاز پر شود. در مقایسه بین خاک و سایر محیط‌ها مانند اتمسفر یا آب دریا، به‌دلیل پیچیدگی‌های بسیار زیاد محیط خاک، امکان دسته‌بندی و تعیین مجموعه‌ای از فاکتورهای ثابت وجود ندارد. وجود هر یک از یون‌های خورنده در خاک تا حدود زیادی باعث افزایش نرخ خوردگی در لوله‌هایی که در تماس با خاک هستند، می‌شود. یون‌های کلرید، سولفات و میزان اسیدیته خاک از مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر نرخ خوردگی در لوله‌های زیرخاکی است؛ به‌طوری‌که این یون‌ها، با کاهش مقاومت الکتریکی خاک باعث افزایش نرخ خوردگی می‌شوند. حفاظت کاتدی (کاتدکردن لوله مدفون با جایگزینی منبع تأمین‌کننده الکترون برای فلز فعال‌تر (آند)) روشی مکمل در کنار اعمال پوشش، برای رسیدن به حداکثر مقاومت در مقابل خوردگی لوله است [۸-۶]. شکل ۱ تصویری از لوله‌های مدفون انتقال گاز را نمایش می‌دهد.

پوشش‌های ضدخوردگی آلی شناخته شده برای خطوط لوله مدفون شامل اپوکسی، پلی‌الفین‌های چندلایه، پلی‌یورتان و پلی‌اوره هستند که مقاله حاضر به بررسی آن‌ها می‌پردازد.

شکل ۱ خط لوله مدفون انتقال گاز.



شکل۲ طرح‌واره پوشش FBE اعمال‌شده بر لوله فولادی.

۲ پوشش اپوکسی

پوشش‌های پودری اپوکسی پیوند هم‌جوشی (FBE, Fusion Bonded Epoxy Coating) در طبقه‌بندی پوشش‌های مقاوم در برابر حرارت (گرما سخت) بوده و از جمله جدیدترین سامانه‌های پوشش در سراسر دنیاست که براساس تاریخچه آن در سال ۱۹۵۹ به‌عنوان محافظ خوردگی خطوط لوله انتقال گاز استفاده شده است. این پوشش از فیلم نازک درست شده که می‌توان آن را بر روی لوله‌هایی با قطرهای مختلف اعمال کرد. مهم‌ترین رزین اپوکسی در پوشش‌های FBE بر پایه دی‌گلیسیدیل اتربیس‌فنول‌آ (DGEBA) یا دی‌گلیسیدیل‌نوولاک است. نوع اول چسبندگی، خواص محیطی و الکتریکی و مقاومت شیمیایی مناسبی دارد. نوع دوم به‌علت اتصال عرضی قوی دمای کاری و مقاومت شیمیایی بالاتری دارد اما انعطاف‌پذیری آن کمتر است. سه نوع سخت‌کننده (عامل پخت) اصلی عبارتند از: سخت‌کننده بازی، سخت‌کننده اسیدی و سخت‌کننده کاتالیزوری. سخت‌کننده بازی شامل آمین‌های آروماتیک، آمین‌های آلیفاتیک، آمیدها و دی‌هیدرازیدها است. سخت‌کننده اسیدی شامل آنیدریدهای آلی، اسیدهای آلی و فنل‌ها است. سخت‌کننده کاتالیزوری شامل موادی مانند اسیدهای لوویس و آمین‌های چهارتایی است و سبب بسپارش یکنواخت می‌شود [۹،۱۰].

پوشش پودر اپوکسی پیوند هم‌جوشی دارای خواص مکانیکی و فیزیکی خوب بوده و به‌طور وسیعی برای عملیات خطوط لوله در خشکی با دمای بالا و یا در زیر زمین به کار می‌رود. از بین تمام سامانه‌های پوشش لوله، این سامانه پوششی مقاومت بیشتری را نسبت به سایر هیدروکربن‌ها، اسیدها و مواد قلیایی دارا است. از آنجایی که این سامانه پوششی عایق الکتریکی خوبی است، جریان بسیار کمی برای حفاظت کاتدی کامل نیاز است درنتیجه هم‌خوانی فوق‌العاده‌ای با فرایند حفاظت کاتدی دارد. بالاترین مزیت استفاده از پوشش اپوکسی لوله در مقایسه با سایر پوشش‌ها، مقاومت آن در حرارت نسبتاً بالا حدود ۱۰۰°C و طول عمر مفید بالا است. محدوده دمای عملیات این پوشش از ۷۰°C- تا ۱۲۰°C است. از سایر ویژگی‌های این سامانه پوششی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۰،۱۱]:

- پایداری فیزیکی و شیمیایی پوشش
- مقاومت در برابر تنش‌های خاک
- چسبندگی عالی به فولاد
- مقاومت دربرابر ضربه
- مقاوم در برابر پدیده جدایش کاتدی

این پوشش اغلب به صورت تک‌لایه با ضخامت بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ میکرون اجرا می‌شود که ویژگی‌های کیفی مناسب و پایداری فیزیکی و شیمیایی، این پوشش را به عنوان پوشش محافظ خوردگی ایده‌آلی در شرایطی اقلیمی متفاوت کشور ایران ساخته است. سامانه دولایه اپوکسی علاوه بر اینکه در لایه اول از پودر اپوکسی برای حفاظت در برابر خوردگی استفاده می‌شود، لایه دوم نیز از جنس اپوکسی اتصال ذوبی است و معمولاً برای حفاظت مکانیکی لوله اعمال می‌شود. اپوکسی لایه دوم بلافاصله بعد از لایه اول در حالی که لایه اول همچنان فعال باشد، روی لوله پاشیده می‌شود تا پیوندهای شیمیایی بین دولایه ایجاد شود [۱۲].

شکل ۲ طرح‌واره‌ای از پوشش FBE اعمال‌شده بر لوله را نشان می‌دهد.

پوشش کولتار اپوکسی، دیگر پوشش اپوکسی مورد استفاده در لوله‌ها، ماده‌ای سخت‌شونده با سخت‌کننده پلی‌آمید است. این محصول با توجه به مقاومت بسیار زیاد در برابر خوردگی و مواد شیمیایی، برای پوشش‌دهی خطوط لوله و مخازن مدفون مناسب است. پوشش کولتار بر روی فلز و بتن قابل اجرا است. پوشش کولتار اپوکسی معمولاً به تنهایی استفاده می‌شود و نیازی به پرایمر یا پوشش رویه اضافی ندارد. ویژگی‌های این پوشش عبارتند از [۱۳،۱۴]:

- چسبندگی بالا به سطوح فلزی و بتنی

- دارای مقاومت مکانیکی بالا
- مقاومت بسیارخوب در محیط‌های غرقابی با آب شور یا شیرین
- مقاومت عالی در برابر گازهای خورنده
- مقاوم در برابر سایش
- مقاوم در برابر نفوذ آب و مواد شیمیایی

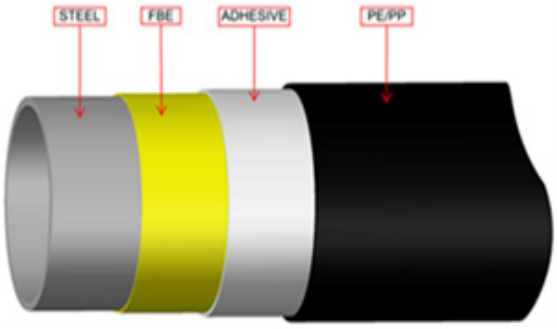
۳ پوشش چندلایه پلی‌الفینی

پوشش‌های سه‌لایه از سال ۱۹۸۰ مورد استفاده هستند؛ پلی الفین که به‌عنوان پوشش رویی مورد استفاده قرار می‌گیرد اغلب از جنس پلی‌اتیلن یا پلی‌پروپیلن است. پوشش سه‌لایه پلی‌اتیلنی (3LPE) یا سه‌لایه پلی‌پروپیلنی (3LPP) مناسب برای خطوط فولادی لوله گاز و نفت زیرزمینی و تأسیسات زیر آب است. لوله‌ها برای اولین بار اعمال، تمیز و گرم می‌شوند. سپس پودر اپوکسی اعمال می‌شود و لایه اول سامانه تشکیل می‌شود. این کار با استفاده از یک چسب کوپلیمر از طریق اکستروژن جانبی انجام می‌شود تا پایداری لازم بین آغازگر و لایه سوم سامانه برقرار شود. در نهایت پلی‌الفین (پلی‌اتیلن یا پلی‌پروپیلن) نیز از طریق اکستروژن جانبی، اعمال سامانه سه لایه را تکمیل می‌کند. این سامانه ویژگی‌های مکانیکی عالی و ویژگی‌های شیمیایی و الکتریکی پایدار را در بر می‌گیرد [۱۷-۱۵]. جدول ۱ مشخصات این پوشش‌ها را نمایش می‌دهد.

سامانه 3LPE برای خطوط لوله‌ای که در دمای بین ۴۰- تا ۸۰ درجه سانتیگراد عمل می‌کند استفاده می‌شود. سامانه 3LPP نیز برای خطوط لوله که در دمای بین ۲۰ تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد عمل می‌کند اعمال می‌شود. به طور معمول، این دو سامانه دارای ضخامت ۱/۵ تا ۳ میلی‌متر هستند. همچنین قطر اسمی این لوله‌ها در محدوده ۲ تا ۴۸ و طول ۸ تا ۱۸ متر است. ضخامت لایه استاندارد حداقل ۲/۵ میلی‌متر یا ۳/۵ میلی‌متر است اما این مقدار را می‌توان بر اساس درخواست مشتری تغییر داد [۱۸].

جدول ۱ مشخصات پوشش‌های چند لایه پلی‌اتیلنی برای خطوط لوله مدفون فولادی انتقال نفت و گاز.

مواد پوشش	مشخصات
لایه سوم، ترکیب PE/PP	چگالی بالا PE (حاوی ۲~ ۳٪ رنگدانه سیاه و سفید و مقدار کمی آنتی اکسیدان) تثبیت PP
لایه دوم، چسب PE/PP	مانند بالا
لایه اولیه	اپوکسی مایع یا FBE



شکل ۳ پوشش خارجی سه لایه پلی‌الفینی اعمال‌شده بر لوله فولادی.

شکل ۳ طرحی از این پوشش‌ها را نمایش می‌دهد. در سال‌های اخیر، تولیدکنندگان داخلی پیشرفت خوبی را در زمینه تولید پوشش‌های اپوکسی و چندلایه پلی الفینی برای خطوط لوله مدفون انتقال نفت و گاز داشته اند که نام و مشخصات برخی از این پوشش‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

در مقایسه پوشش پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن باید گفت که پلی‌پروپیلن دمای سرویس بالاتری دارد و برای انتقال سیالات تا دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد گزینه مناسبی است، ضمناً از نظر مقاومت ضربه و مقاومت سایشی شرایط بهتری نسبت به پلی‌اتیلن دارد و برای پروژه‌هایی که احتمال آسیب دیدن پوشش بالاتر است، مانند زمین‌های سنگلاخی، کوهستان‌ها یا عملیات حفاری مناسب‌تر است.

۴ پوشش پلی‌یورتان

امروزه از پوشش‌های پلی‌یورتان برای پوشش‌دهی انواع لوله‌های فولادی برای صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، انتقال آب و سایر صنایع استفاده می‌شود. پوشش پلی‌یورتان به عنوان ماده پلیمری که در حال جایگزینی کامل به جای پوشش‌های پلی‌الفینی است، از مزایای زیادی، نظیر خواص ممتاز مکانیکی و شیمیایی برخوردار است. پوشش‌های پلی‌یورتان ۱۰۰ درصد جامد (اصطلاح بدون حلال یا ۱۰۰ درصد جامد این پوشش‌ها بیانگر این موضوع است که هنگام ساخت یا در زمان کاربرد آن‌ها از هیچ‌گونه حلالی استفاده نمی‌شود.) عضو مهمی از خانواده بزرگ پوشش‌های پلی‌یورتان محسوب می‌شوند. از سال ۱۹۳۰ تا امروز این ماده پیشرفت‌های زیادی کرده است و در پوشش‌دهی خطوط لوله مدفون انتقال نفت و گاز کاربرد بسیار دارد [۱۹].

پوشش‌های پلی‌یورتان ۱۰۰ درصد جامد پوشش‌های دو

جدول ۲ ویژگی‌های پوشش‌های تجاری اپوکسی و پلی‌الفینی موجود.

نام محصول	شرکت تولیدکننده	ویژگی‌ها و ملاحظات
پوشش اپوکسی کولتار ABADUR_210	آبادگران	چسبندگی بسیار زیاد به سطوح ، مقاومت مکانیکی بسیار بالا، مقاومت مطلوب در برابر سایش و خوردگی و....
پوشش اپوکسی کولتار CO-214	مواد مهندسی مکرر	دو جزیی، مناسب برای سطوح مدفون و مغروق، بسیار موثر در حفاظت خوردگی محیطی و یون کلر
پوشش اپوکسی کولتار EK160	بتن پلاست	چسبندگی بالا به سطوح فلزی و بتنی ، مقاومت عالی در برابر گازهای خورنده، مناسب برای سطوح فولادی مدفون زیر خاک و مخازن نگه‌داری مواد شیمیایی
پوشش اپوکسی FBE	LINKUN	تنوع محصول از قطر ۱۱۴-۱۴۲۲ میلی‌متر، مناسب برای پوشش خارجی خطوط لوله فولادی مدفون (اجرا تحت استاندارد ISO 21809)
پوشش سه‌لایه پلی‌اتیلنی	نیک محضر اسپادانا	لایه‌ها به ترتیب از بالا به پایین: FBE، چسب، پلی‌اتیلن، دمای عملیاتی زیر ۸۰ درجه سانتی‌گراد، جذب آب کم، مقاومت الکتریکی بسیار بالا، مناسب برای خطوط لوله و مخازن مدفون

جزئی بوده که یک جزء آن پلی‌اُل و جزء دیگر آن پلی‌ایزوسیانات است. این ماده در گروه مواد گرماسخت طبقه‌بندی می‌شود. این پوششها به دلیل مقاومت مکانیکی خوب، مقاومت شیمیایی عالی و قابلیت چسبندگی بالا به انواع سطوح فلزی و غیرفلزی، به‌عنوان پوششی با عملکرد عالی برای سطوح داخلی و خارجی لوله‌های گاز، نفت خام، ترکیبات نفتی، آب آشامیدنی، فاضلاب، پوشش خارجی لوله‌های مدفون در زیر خاک یا مستغرق زیر دریا، پوشش داخلی مخازن نفت، گاز حوضچه‌های تصفیه فاضلاب، مخازن نگه‌داری مواد شیمیایی و... محسوب می‌شوند. به‌طورکلی از خصوصیات مطلوب پوشش‌های پلی‌یورتان ۱۰۰ درصد جامد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۳۰-۲۰]:

– این پوشش بدون حلال بوده و به منظور کاربرد آن بر روی سطح نیازی به استفاده از حلال‌هایی مانند تینر برای رقیق کردن آن نیست؛ بنابراین کاملاً سازگار با محیط زیست است و می‌تواند برای پوشش‌دهی سطوح در مجاورت با آب آشامیدنی و مواد غذایی نیز به کار رود.

– به‌دلیل قابلیت چسبندگی بسیار بالا بر روی سطوح مختلف (بتنی، آهنی، آلومینیومی و...) و داشتن خاصیت ارتجاعی بسیار بالا (تا ۵۰ درصد ازدیاد طول را تحمل می‌کند)، این پوشش قابلیت تحمل هرگونه ضربه و تغییرات ابعادی را دارد.

– مقاومت عالی در برابر اشعه مخرب فرابنفش.

– مقاومت بسیار عالی در برابر شوک‌های حرارتی تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد.

– در مواردی که پوشش دچار صدمه ناگهانی شود به راحتی قابل ترمیم است.

– قابلیت ضداشتعال مطلوب.

– آلودگی‌ها بر روی این پوشش نمی‌چسبد و به راحتی قابل تمیز کردن است.

– از خواص مکانیکی دیگر این پوشش می‌توان به مقاومت بالا در برابر پارگی ($۱۸۰kg/mc^2$)، انقباض صفر درصد، چسبندگی بالا (برای مثال در خصوص فولاد بالاتر از ۱۰مگاپاسکال) و سختی مناسب (۵±۷۵ Shore D) اشاره کرد.

– نفوذپذیری بسیار پایین به ویژه در مقابل بخار آب

– زمان نیمه‌عمر پوشش ۳۰ سال است به طوری که پس از این مدت خواص مکانیکی و شیمیایی آن به نصف کاهش یافته ولی همچنان قابل سرویس‌دهی است.

– دارای مقاومت شیمیایی عالی در برابر مواد شیمیایی خورنده با pH =۱-۱۳ است.

پوشش‌های پلی‌یورتان به طریق مذکور در زیر از خوردگی سازه‌های زیر خاک جلوگیری می‌کنند[۲۴]

الف) با ایجاد لایه چسبنده و با ماده‌ای بسیار مقاوم در مقابل انتقال یونی، از خوردگی جلوگیری می‌کنند.

ب) با ایجاد لایه عایق الکتریکی شدت جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی را کاهش می‌دهند.

ج) توزیع یکنواخت شدت جریان حفاظت کاتدی را فراهم می‌کند.

اگرچه فرایند پوشش دهی اولیه مستلزم هزینه زیادی است، استفاده از پوشش پلی‌یورتان باعث کاهش قابل ملاحظه مصرف برق حفاظت کاتدی می‌شود. پوشش‌ها به‌عنوان بخش تکمیل‌کننده سامانه حفاظت کاتدی محسوب می‌شوند. در اکثر شرایط، پوشش‌ها عامل اصلی موفقیت سامانه حفاظت کاتدی هستند، با ایجاد پشتیبانی از حفاظت کاتدی، نقاطی از سازه فلزی که پوشش معیوب و یا صدمه دیده دارد حفاظت می‌شود.

جدول ۳، ویژگی‌های برخی پوشش‌های پلی‌یورتان ضدخوردگی تولید داخل و قابل اعمال بر لوله‌های مدفون را با یکدیگر مقایسه می‌کند:

استفاده از تصاویر میکروسکوپی فصل مشترک پوشش و زیرلایه، نحوه اتصال و نحوه قرارگیری لایه‌های مختلف روی یکدیگر در هر سه پوشش FBE ، پلی‌الفینی سه‌لایه و پلی‌یورتان در شکل ۴ نمایش داده شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

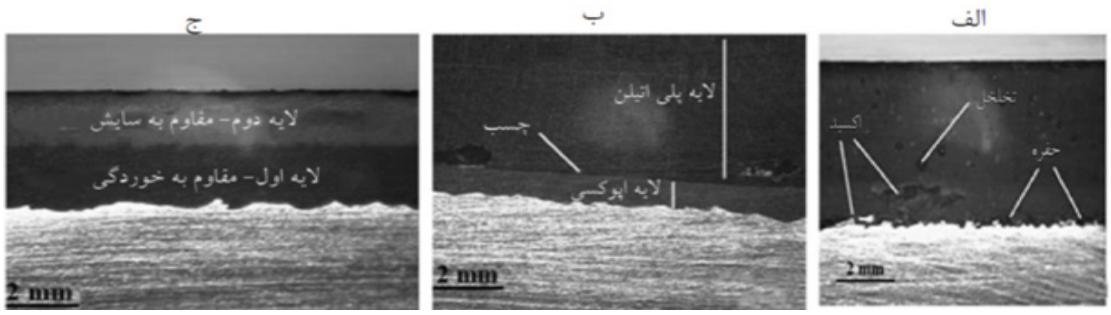
با توجه به قسمت الف شکل ۴، تخلخل‌های موجود در پوشش پلی‌یورتان که به ماهیت آن برمی‌گردد و وجود آن طبیعی است قابل مشاهده است. در فصل مشترک پوشش و فلز، وجود ذرات ناخواسته، اکسیدها، حفرات و عدم چسبندگی مناسب سطح و پوشش دیده می‌شود. وجود این عیوب در پوشش به خصوص در فصل مشترک پوشش و زیرلایه، زمینه نفوذ الکترولیت به فصل مشترک را به سرعت فراهم می‌کند و در مدت زمان بسیار کمی الکترولیت در طول عیوب حرکت می‌کند و در نهایت اندازه شعاع جدایش کاتدی به‌طور ناخواسته افزایش می‌یابد. قسمت ب شکل ۴، تصویر میکروسکوپی پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، سطح لوله دارای پستی بلندی‌های لازم برای تشکیل قفل‌های شیمیایی و مکانیکی بوده است. همچنین در فصل مشترک پوشش و سطح لوله، حفره و ذرات ناخواسته دیده نمی‌شود. قسمت ج شکل ۴ نیز تصاویر میکروسکوپی اپوکسی پیوند هم‌جوشی دولایه را نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر، سطح لوله دارای پستی و بلندی‌های لازم برای تشکیل قفل‌های شیمیایی و مکانیکی بوده است. همچنین در فصل مشترک پوشش و سطح لوله حفره و ذرات ناخواسته دیده نمی‌شود. نتایج حاصل از آزمون جدایش کاتدی در دمای محیط برای این سه پوشش که در جدول ۴ نشان داده شده است، موید توضیحات فوق است [۲۷-۲۵].

۵ پوشش پلی‌اوره

پوششهایی نظیر پلی‌یورتان و اپوکسی نمی‌توانند در مناطق مرطوب نظیر مناطق جنوبی کشور که تابش نور خورشید بسیار شدید است و بخشی از تجهیزات نیز در معرض آب شور قرار

جدول ۳ مقایسه پوشش‌های پلی‌یورتان تجاری موجود برای لوله‌های مدفون.

نام شرکت (محصول)	زمان گیرش	گرانروی (Poise)	مقاومت کششی (MPa)	مدول (MPa)	ضخامت پیشنهادی (mm)
افزیر (عایق پلی‌یورتان –قابل استفاده در خطوط لوله مدفون)	۲۴ ساعت	۴۰۰۰۰	۲/۱	۱	۱-۲
گروه صنعتی مکرر(عایق پلی‌یورتان ضدخوردگی لوله‌های مدفون)	۲۴-۱۵ ساعت	۲۵۰۰۰	۱/۶	۰.۸	۳
جهان عایق پارس (عایق لوله‌ای پلی‌یورتان)	۲۴ ساعت	۲۵۰۰۰	۱/۷	۱	۱-۰/۵
نمایندگی برند ABTER (پوشش پلی‌یورتان ویژه لوله‌های فولادی مدفون)	۳-۱ روز	۴۰۰۰۰	۵-۲	۲-۱	۰/۵



شکل۴ تصاویر میکروسکوپی: الف) فصل مشترک پوشش پلی‌یورتان، ب) تصویر میکروسکوپی پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه و ج) تصویر میکروسکوپی پوشش اپوکسی پیوند هم‌جوشی (FBE)دولایه [۲۵].

دارند، دوام زیادی داشته باشند. بررسی‌ها نشان داده است که عدم انتخاب مناسب رنگ باعث می‌شود مشکلاتی نظیر تاول‌زدگی و عدم چسبندگی به زیرلایه، پوسته شدن، ورقه شدن، زنگ‌زدگی نقطه‌ای، ترک‌های زیرسطحی (موترک)، ترک‌های عمیق، ترک‌های بزرگ، تغییر رنگ دادن، چین و چروک، جدایش بین لایه‌ها، گچی شدن، گردی شدن، خوردگی در محل‌های جوش‌کاری شده، فعالیت میکروارگانیسم‌ها، شره‌کردن رنگ، پاشش خشک و... به وجود بیاید که تمامی این معایب منجر به خوردگی اتصالا و تجهیزات شده و عمر مفید آن‌ها را کاهش می‌دهد. لذا وجود پوششی نوین و با کیفیت از اولویت‌های این صنعت محسوب می‌شود [۲۸،۲۹].

استفاده از پلی‌اوره در پوشش‌دهی سامانه‌های لوله‌کشی (شکل ۵) شرکت‌های نفتی بزرگ دنیا نظیر شرکت ملی نفت چین انجام شده است [۳۰]. پوشش‌های پلی‌اوره سرد گریدهای ۲۰۶۰ و ۲۰۷۰ انتخابی مناسب و به‌صرفه برای استفاده به‌عنوان پوشش انواع تجهیزات پتروشیمیایی و نفتی شامل پالایشگاه‌ها، لوله‌ها و تانکرها، ایستگاه‌های گاز، دکل‌های حفاری خشکی و دریایی، سکوهای نفتی، کپسوله کردن خطوط لوله مدفون، مخازن و... محسوب می‌شوند. با توجه به اهمیت کم ظاهر سطوح در برخی از بخش‌های صنعت نفت و پتروشیمی، می‌توان از پلی‌اوره به‌طور بهینه استفاده کرد. همچنین در مواردی که تنش‌های محیطی وارده بالا باشند، استفاده از پلی‌اوره گرم پیشنهاد می‌شود [۳۱].

مزایای پوشش ضدخوردگی پلی‌اوره عبارتند از [۲۹-۳۱]:

- سرعت اجرایی بالا و غیرقابل‌رقابت
- عدم حساسیت به رطوبت
- عدم تولید گاز، ایجاد تاول، حباب، کف و نقص‌های ظاهری نظیر نوک سوزنی‌شدن
- زمان واکنش بسیار کم بدون نیاز به کاتالیزور
- خشک شدن بسیار سریع به‌منظور کنترل زمان ساخت و افزایش بهره‌وری در پروژه‌ها
- پوشش کاملاً جامد و بدون بو، حلال و مواد آلی فرار و عدم تأثیر منفی بر آب (دوست‌دار محیط‌زیست)
- مقاومت بسیار بالا در برابر خوردگی و گردوغبار
- مقاومت دمایی بالا
- مقاوم در برابر شرایط آب‌وهوایی متفاوت
- مقاومت بی‌نظیر در برابر سایش
- سختی سطحی بالا و مقاوم در برابر خراش

با وجود مزایای رقابتی منحصربه‌فرد پوشش ضدخوردگی پلی‌اوره جهت اعمال بر لوله‌های مدفون انتقال نفت و گاز، متأسفانه در ایران آنچنان که باید و شاید به تولید داخلی این محصول توجه نشده است.

جدول۴ نتایج آزمون جدایش کاتدی در دمای محیط [۲۵].

نوع پوشش	روش آزمایش	متوسط شعاع جدایش کاتدی (mm)
پلی‌اتیلن سه‌لایه	ISO 21809	۲/۷۳
پلی‌یورتان	ISO 21809	۱۷/۱۱
FBE	ISO 21809	۷/۳۴

شکل ۵ اعمال پاششی پوشش پلی‌اوره بر لوله فولادی.

۶ نتیجه گیری

نظر به اهمیت انکارناپذیر جلوگیری از خوردگی تجهیزات در صنعت نفت و گاز، در این پژوهش، پوشش‌های صنعتی آلی پرکاربرد در مقابله با خوردگی لوله‌های مدفون انتقال نفت و گاز معرفی گشت و ویژگی‌های آن‌ها بررسی شد. پوشش‌های FBE و کولتار، دو دسته مهم پوشش‌های اپوکسی قابل اعمال بر خطوط لوله مدفون بوده که مقاومت شیمیایی عالی و انطباق مناسب با فرایند حفاظت کاتدی دارند. پوشش‌های چندلایه پلی‌الفینی که در آن‌ها از پلی‌اتیلن یا پلی‌پروپیلن به‌عنوان لایه رویی استفاده می‌شود نیز در پیشگیری از خوردگی خطوط لوله مدفون بسیار پرکاربرد بوده و خواص مطلوب مکانیکی، شیمیایی و الکتریکی را به ارمغان می‌آورند. در سالیان اخیر، پوشش‌های پلی‌یورتان ۱۰۰ درصد جامد به‌دلیل ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی عالی، قابلیت استفاده در محیطه‌ای گوناگون و از همه مهم‌تر ایمنی بالا و سازگاری با محیط‌زیست به‌دلیل فقدان حلال، بسیار مورد توجه قرار گرفته و به تدریج در حال جایگزینی پوشش‌های پلی‌الفینی هستند. نتایج آزمون جدایش کاتدی در دمای محیط نشان داده است که کمترین شعاع جدایش مربوط به پوشش پلی‌اتیلن سه‌لایه به میزان ۲/۷۳ میلیمتر بوده و بیشترین جدایش را پوشش پلی‌یورتان به میزان ۱۷/۱۱ میلیمتر دارا بوده است. با توجه به تصاویر میکروسکوپی، دلیل بالا بودن میزان شعاع جدایش کاتدی پوشش پلی‌یورتان، وجود ذرات ناخواسته، اکسیدها، حفرات و عدم چسبندگی مناسب سطح و پوشش است.

مراجع

1. Samimi A., Zarinabadi S., Application Polyurethane as Coating in Oil and Gas Pipelines, *Int .J. Sci. Eng. Investig*, 1, 43-45, **2012**.

2. Branch M., Mahshahr I., Use of Polyurethane Coating to Prevent Corrosion in Oil and Gas Pipelines Transfer, *Int. G. Res. Sci. Innov. Appl. Sci*, 1, 2, 186-193, **2012**.

3. Parkins R.N., A Review of Stress Corrosion Cracking of High Pressure Gas Pipelines, In Corrosion 2000. Onepetro, **2000**.

4. Nesic S., Key Issues Related to Modelling of Internal Corrosion of Oil and Gas Pipelines–A Review, *Corros. Sci*, 49, 4308-4338, **2007**.

5. Velazguez J., Caleyo F., Valor A., and Hallen J., Predictive Model for Pitting Corrosion in Buried Oil and Gas Pipelines, *Corros*, 65, 5, 332-342, **2009**.

6. Ferreira C.A.M., Ponciano J.A., Vaitsman D.S., and Perez D.V., Evaluation of the Corrosivity of the Soil Through its Chemical Composition, *Sci. Total Environ* , 388, 1-3, 250-255, **2007**.

7. Robinson W., Testing Soil for Corrosiveness, *Mater. Perform*, United States, 32, 56-58, 1993.

8. Bradford S., Practical Handbook of Corrosion Control in Soils, second ed., CASTI Corrosion Series, Edmonton, Canada, **2000**.

9. Tian-Bo S., External Fusion Bonded Epoxy Coating for Steel Pipeline, *Corros. Prot*., 7, 374-377, **2006**.

10. Papavanasm S., Revie R.W., Protective Pipeline Coating Evaluation, in Corrosion 2006, **2006**.

11. Li C., Caob., Wu Y., An Electrochemical Method for Evaluating the Resistance to Cathodic Disbondment of Anti-Corrosion Coatings on Buried Pipelines, *J. Sci. Technol*, 14., 5, 414-419, **2007**.

12. Njoku C. N., Bai W., Meng M., Arukalam I O., Njoku D I., and Li Y., Epoxy-Based Bi-Layer Self-Repairing Coating With Anti-Corrosive Functionalities for the Protection of A2024 Aluminum Alloy, *Mater. Res. Express*, 6, 115706, **2019**.

13. Qi M., Availability of Coal tar Epoxy Used as Aanti-Corrosion, Coating for Underground, Pipelines, *Adm. Inf. Technol*, 2, 95-104, **2002**.

14. Modiri B., Pourgol M., Yazdani M., Nasirpouri F., and Salehpour F., Piping Anti–Corrosion Coating Life Assessment, *In Asme International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 46637, V014T08A013, **2014**.

15. Samimi A., Zarinabadi S., Shahbazi A.H., Azimi A., and Mirzaei M., Corrosion in Polyethylene Coatings Case Study: Cooling Water Pipelines, *Chem. Methodol*, 4, 378-399, **2020**.

16. Aalund L., Polypropylene System Scores High as Pipeline Anti-Corrosion Coating," *Oil. Gas. J*., 90, 50, **1992**.

17. Gaber M.A.W., Impact of Anti-Corrosion Liquid Epoxy and Fusion Bond Epoxy Primer on Mechanical Testing of Three Layers Polyethylene Pipeline Coating, *Res. J. Appl. Sci*, 8, 11, 5349-5359, **2012**.

18. Branch M.,"Study an Analysis and Suggest New Mechanism of 3-layer Polyethylene Coating Corrosion Cooling Water Pipeline in Oil Refinery in Iran, *Int. J. Res. Sci. Innov. Appl. Sci*, 1, 2, 216-225, **2012**.

19. Oertel G., Polyurethane Handbook, ed: Hanser Publisher. Munich Vienna, New York, **1985**.

20. Chattopadhyay D., Mishra K., Sreedhar B., and RAJU K., Thermal and Viscoelastic Properties of Polyurethane-Imide/ Clay Hybrid Coatings, *Polym. Degrad. Stab*., 91, 8, 1837-1849, **2006**.

21. Manea M., Kirmaier L., and Sander J., Organic Coating Materials, in Anticorrosive Coatings: Vincentz Network, 37-98, **2014**.

22. Samimi A., and Zarinabadi S., Application Polyurethane as Coating in Oil and Gas Pipelines, *Int. J. Sci. Eng. Investig*, 1, 8, 43-45, **2012**.

23.Branch M., and Mahshahr I., Use of Polyurethane Coating to Prevent Corrosion in Oil and Gas Pipelines Transfer, *Int.G. Res. Sci. Innov. Appl. Sci.*, 1, 186-193, **2012**.

24. Samimi A., and Zarinabadi S., An Analysis of Polyethylene Coating Corrosion in Oil and Gas Pipelines, *Am. J. Sci.*, **2011**.

25. Bathaee A., Nourouzi S., Jamshidi Aval H., and Seyf S., Comparison and Study of Coating Properties of Three-Layer Polyethylene, Polyurethane and Fusion Bonded Epoxy for Pipelines," *Petroleum Research,* 28, 51-55, **2018**.

26.Wel Y., Zhang L., and Ke W., Comparison of the Degradation Behavior of Fusion-Bonded Epoxy Powder Coating Systems Under Flowing and Static Immersion, *Corros. Sci*., 48,1449-1461, **2006**.

27. Hnyp I., Zin Y.I., and Biliy L., Influence of Inhibitors on the Resistance of Polymeric Corrosion-Inhibiting Coatings to Cathodic Delamination, *Mat. Sci*., 47, 1, 108-113, **2011**.

28. Howarth G.A., Polyurethanes, Polyurethane Dispersions and Polyureas: Past, Present and Future, *Surf. Coat. Int*., 86,

111-118, **2003**.
29. Shojaei B., Najafi M., Yazdanbakhsh A., Abtahi M., and Zhang C., A Review on the Applications of Polyurea in the Construction Industry, *Polym. Adv. Technol.*, 32, 2797-2812, **2021**.
30. Deng P., Outward Investment by Chinese MNCs: Motivations and Implications, *Bus. Horiz*, 47, 8-16, **2004**.
31. Toutanji H.A., Choi H., Wong D., Gilbert J. A., and D. J. Allddredge D.J., Applying a Polyurea Coating to High-Performance Organic Cementitious Materials, *Constr. Build. Mater*, 38, 1170-1179, **2013**.